

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia de Energia

Aprimoramento de Bancada Didática para Estudo de uma Linha de Transmissão

Autor: Adryelle Faccio Damasceno
Orientador: Prof. Dr. Alex Reis

Brasília, DF
2019



Adryelle Faccio Damasceno

Aprimoramento de Bancada Didática para Estudo de uma Linha de Transmissão

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Alex Reis

Brasília, DF

2019

Adryelle Faccio Damasceno

Aprimoramento de Bancada Didática para Estudo de uma Linha de Transmissão

Monografia submetida ao curso de graduação
em Engenharia de Energia da Universidade
de Brasília, como requisito parcial para ob-
tenção do Título de Bacharel em Engenharia
de Energia.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, dezembro de 2019:

Prof. Dr. Alex Reis
Orientador

Prof^a. Dr^a Loana Nunes Velasco
Convidada

Prof. Dr. Jorge Andrés Cormane
Angarita
Convidado

Brasília, DF
2019

Resumo

Com o crescimento demográfico e a expansão dos grandes centros urbanos, surgiu a necessidade de transmitir energia elétrica entre longas distâncias. O transporte de energia é realizado por meio de linhas de transmissão que conectam os pontos geradores às subestações, as quais distribuem energia para as unidades consumidoras. Portanto, o estudo e a compreensão deste campo da engenharia é de suma importância para o desenvolvimento de mecanismos de transmissão de energia mais seguros e eficientes. Na Universidade de Brasília, Campus Gama, é ministrada a disciplina Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica, cujo objetivo é o entendimento da organização, do funcionamento e do desenvolvimento do sistema elétrico brasileiro. Tendo em vista as necessidades laboratoriais desta disciplina, iniciou-se um projeto de construção de uma bancada que simula uma linha de transmissão real, visando a realização de experimentos a respeito dos conteúdos discutidos nas aulas. Este projeto foi iniciado por um ex-aluno do curso de Engenharia de Energia. O presente trabalho visa dar continuidade à construção desta bancada e realizar o aprimoramento dos experimentos, bem como disponibilizar os métodos, gabaritos, análises, cálculos teóricos e simulações no software ATPDraw.

Palavras-chave: Linhas de Transmissão. Potência Natural. Circuito pi. Efeito Ferranti. Quadripolos.

Abstract

With population growth and the expansion of large urban centers, it arose the need to transmit electricity between long distances. That energy is transported through transmission lines that connect generating points to substations, which distribute energy to consumer units. Therefore, the study and understanding of this field of engineering are important for the development of safer and more efficient power transmission mechanisms. At the Campus Gama of the University of Brasilia, is taught the discipline of Electric Power Transmission and Distribution, whose objective is the understanding of the organization, operation, and development of the Brazilian electricity system. Given the laboratory requirements of this discipline, a project was started to build a workbench that simulates a real transmission line, allowing experiments to be carried out with respect to the contents discussed in the classes. This project was started by a former student of the Energy Engineering course. The present work aims to continue the construction of this workbench and perform the improvement of the experiments, as well as provide methods, solutions, analysis, theoretical calculations and simulations in ATPDraw software.

Key-words: Transmission Lines. Natural Power. Circuit π . Ferranti Effect. Quadripoles.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Circuito Equivalente Monofásico de Linha de Transmissão com Parâmetros Distribuídos. Fonte: (PAZ, 2005)	19
Figura 2 – Representação de um quadripolo pelos parâmetros ABCD. Fonte adaptada: (FUCHS, 2015)	24
Figura 3 – Mapa da Linha de Transmissão. Fonte: (ANEEL, 2007).	28
Figura 4 – Projeto Estrutural da Bancada.	29
Figura 5 – Linha artificial representada no ATP. Fonte: Elaboração Própria via ATP	30
Figura 6 – Representação do Circuito Equivalente Monofásico para a LT de 400 km. Fonte: Elaboração Própria via ATP	32
Figura 7 – Representação de onda entre entrada e saída da LT aberta. Fonte: Elaboração Própria via ATP	33
Figura 8 – Circuito Equivalente Monofásico sobcarga. Fonte: Elaboração Própria via ATP	36
Figura 9 – Representação de onda para linha operando a $0,5P_0$. Fonte: Elaboração Própria via ATP	37
Figura 10 – Representação de onda para linha operando a P_0 . Fonte: Elaboração Própria via ATP	39
Figura 11 – Representação de onda para linha operando a $1,5P_0$. Fonte: Elaboração Própria via ATP	41
Figura 12 – Tensões U_1 para diferentes potências x Comprimento da LT. Fonte: Elaboração Própria.	43
Figura 13 – Correntes I_1 para diferentes potências x Comprimento da LT. Fonte: Elaboração Própria.	43
Figura 14 – Representação do circuito com receptor aberto. Fonte: (FUCHS, 2015)	44
Figura 15 – Representação no ATP do circuito com receptor a vazio. Fonte: Elaboração Própria via ATP	44
Figura 16 – Representação do circuito com receptor em curto. Fonte: (FUCHS, 2015)	44
Figura 17 – Representação no ATP do circuito com receptor em curto. Fonte: Elaboração Própria via ATP	45

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros LT real	28
Tabela 2 – Parâmetros LT artificial	28
Tabela 3 – Efeito Ferranti	32
Tabela 4 – Efeito Ferranti ATP	32
Tabela 5 – Efeito Ferranti medição na Bancada	33
Tabela 6 – Comparação dos resultados - Efeito Ferranti	34
Tabela 7 – Erros em relação aos valores calculados - Efeito Ferranti	34
Tabela 8 – Tensão a vazio	34
Tabela 9 – Tensão a vazio medição na Bancada	35
Tabela 10 – Comparação de resultados - Perfil a vazio	35
Tabela 11 – Erros em relação aos valores calculados - Perfil a vazio	36
Tabela 12 – 0,5 da Potência Natural: $Z_2 = 417,61 \Omega$	37
Tabela 13 – Medição para 0,5*Potência Natural: $Z_2 = 417,61 \Omega$	38
Tabela 14 – Comparação de resultados - Perfil a $0,5 * P_0$	38
Tabela 15 – Erros em relação aos valores calculados - $0,5 * P_0$	38
Tabela 16 – Potência Natural: $Z_2 = 208,80 \Omega$	39
Tabela 17 – Medição para Potência Natural: $Z_2 = 208,80 \Omega$	40
Tabela 18 – Comparação de resultados - Perfil a P_0	40
Tabela 19 – Erros em relação aos valores calculados - Perfil a P_0	40
Tabela 20 – 1,5 da Potência Natural: $Z_2 = 139,2 \Omega$	41
Tabela 21 – Medição para 1,5 da Potência Natural: $Z_2 = 139,2 \Omega$	41
Tabela 22 – Comparação de resultados - Perfil a $1,5 * P_0$	42
Tabela 23 – Erros em relação aos valores calculados - Perfil a $1,5 * P_0$	42
Tabela 24 – Constantes da LT	46
Tabela 25 – Resultados testes na Bancada	46
Tabela 26 – Constantes da Linha - Medição Bancada	47
Tabela 27 – Comparação de resultados - Constantes da LT	47
Tabela 28 – Erros em relação aos valores calculados - Constantes da LT	47

Lista de abreviaturas e siglas

UnB	Universidade De Brasília
FGA	Faculdade UnB Gama
LT	Linha de Transmissão
SIN	Sistema Interligado Nacional
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>

Lista de símbolos

γ	Constante de Propagação
i	Corrente Elétrica
U	Tensão Elétrica
L	Indutância
r	Resistência Elétrica
C	Capacitância Elétrica
g	Condutância Elétrica
x	Comprimento da Linha de Transmissão
t	Tempo
P_c	Potência Característica
P_o	Potência Natural
Ω	Unidade de Resistência Elétrica
δ	Diferença
α	Constante de Atenuação
β	Constante de Fase
ω	Velocidade Angular

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	18
1.2	Objetivos Específicos	18
2	LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	19
2.1	Análise Matemática	19
2.2	Análise da Linha em relação a Carga	21
2.2.1	Linha a vazio no Receptor ou com Carga Leve	22
2.2.2	Linha sob Carga no Receptor	22
2.3	Constantes da Linha - Quadripolos	24
2.4	Compensação de Linhas	25
3	METODOLOGIA	27
3.1	Caso de Estudo	28
3.2	Montagem Laboratorial	29
3.3	Simulações ATP	30
4	RESULTADOS	31
4.1	Efeito Ferranti	31
4.1.1	Comparação dos Resultados - Efeito Ferranti	34
4.2	Perfil Tensão e Corrente a Vazio	34
4.2.1	Comparação dos Resultados - Perfil Tensão e Corrente a Vazio	35
4.3	Perfil Tensão e Corrente sob Carga	36
4.3.1	Linha operando a 50% da Potência Natural	36
4.3.1.1	Comparação dos Resultados - Perfil Tensão e Corrente a 50% da P_0	38
4.3.2	Linha Operando a Potência Natural	39
4.3.2.1	Comparação dos Resultados - Perfil Tensão e Corrente a P_0	40
4.3.3	Linha Operando a 150% da Potência Natural	40
4.3.3.1	Comparação dos Resultados - Perfil Tensão e Corrente a 150% da P_0	42
4.3.4	Análise Geral	42
4.4	Quadripolos - Constantes da LT	43
4.4.1	Comparação dos Resultados	47
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
	REFERÊNCIAS	51

ANEXOS	53
ANEXO A – CÓDIGO 1	55

1 Introdução

Atualmente no Brasil, as distâncias entre os centros geradores e as unidades consumidoras de energia elétrica estão cada vez maiores, devido ao esgotamento das reservas hídricas próximas aos grandes centros consumidores. Dessa forma, o transporte de grandes blocos de energia por longas distâncias da ordem de 1000 km é cada vez mais necessário, tornando significativamente importante a redução de custos das Linhas de Transmissão (LT) e garantindo uma eficiência do Sistema Interligado Nacional (SIN) de energia elétrica (FONSECA, 2010). Além das LT propriamente ditas, essas redes de transmissão de energia elétrica também são compostas por subestações de transformação, dotadas de transformadores e equipamentos de proteção e controle. A energia que transita nessas linhas é em corrente alternada (60 Hz) em tensões elevadas (138 a 500 Kv) (ABRADEE, 2017).

As linhas aéreas de transmissão podem ser classificadas em três tipos dependendo do seu comprimento e nível de tensão. As linhas classificadas como curtas têm comprimento de até 80 km, as chamadas de linhas médias são entre 80 km a 240 km e linhas longas são acima de 240 km. Para as linhas curtas, geralmente despreza-se a capacitância delas por serem muito pequenas, sendo consideradas apenas resistência e indutância em série. Já as linhas médias (como é caso da linha abordada neste trabalho), são comumente representadas pelo modelo π , incluindo todos os parâmetros da linha. Enquanto as linhas grandes podem ser representadas por mais de um modelo π ou pelo modelo de parâmetros distribuídos (LEWIS, 2008). Essas classificações têm como objetivo a praticidade do modelo a ser usado nos cálculos de corrente e tensão, podendo levar em conta ou desconsiderar certos parâmetros na análise matemática.

O estudo das ligações físicas de uma LT são relativamente complexos, pois abordam conhecimentos de eletromagnetismo e circuitos, ocasionando em equações diferenciais. Tais conhecimentos são essenciais para o entendimento dos conteúdos referidos aos projetos e análises de linhas de transmissão, pois envolvem tópicos como fluxos de carga, curto-circuitos, estabilidade e otimização de sistemas elétricos (RAU, 2003). De fato, a base teórica forte deste conteúdo é muito importante para acompanhar, incentivar e realizar as mudanças necessárias nesse setor de energia elétrica. Para tanto, discussões e fóruns sobre reformas e conteúdos curriculares estão em pauta, além de ferramentas e procedimentos adequados à educação em engenharia nesta área (ENGINEERING, 2006).

1.1 Objetivos

O propósito deste trabalho é dar continuidade ao projeto de uma bancada para simulação de um trecho da linha de transmissão de São João do Piauí-Milagres, localizada no Nordeste brasileiro (SILVA, 2017). O aprimoramento dessa bancada visa suprir a necessidade de aulas práticas, em laboratório, da disciplina de "Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica", ofertada pelo curso de Engenharia de Energia da Universidade de Brasília (UnB), Campus Gama.

1.2 Objetivos Específicos

1. Aprimoramento dos experimentos elaborados para a disciplina Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica.
2. Detalhamento da teoria necessária para a compreensão dos experimentos e análise dos resultados.
3. Projeto e construção da estrutura da bancada no Laboratório de Eletricidade Aplicada da UnB, Campus Gama.
4. Realização dos experimentos e comparação dos resultados laboratoriais com a teoria e simulações em software.

2 Fundamentação Teórica

O transporte de energia elétrica é realizado através de linhas de transmissão formadas por equipamentos capazes de conduzir grande quantidade de energia por longas distâncias entre os centros consumidores (receptores) e centros geradores (transmissor) (LIMA; PEREIRA, 2001). Para análise de equações de circuito referente à linha de transmissão, parâmetros de resistência, indutância, capacitância e condutância são considerados distribuídos ao longo de sua extensão.

Para o desenvolvimento de tipos de linhas de transmissão, observa-se os parâmetros longitudinais e transversais da linha são relacionados pela característica físicas da linha e pelas características do meio inserida. Considera-se também, que os parâmetros da linha são distribuídos ao longo de seu comprimento

2.1 Análise Matemática

Uma linha de transmissão uniforme pode ser montada com infinitas seções de impedância série e admitância em paralelo (JOHNSON, 1980). Ao se passar uma corrente variante nos condutores, ela induz uma tensão no indutor representado ao longo da linha como indutância L por unidade de comprimento (H/km). A indutância é responsável por armazenar energia no campo magnético. Observa-se também o acúmulo de cargas entre os condutores, referido por uma capacitância C invariante por unidade de comprimento (F/km) que armazena energia no campo elétrico. A resistência r (ohm/km) consome energia, com perda de potência. Por fim, a condutância g , dada por (S/km), que representa imperfeições no isolamento. (PAZ, 2005).

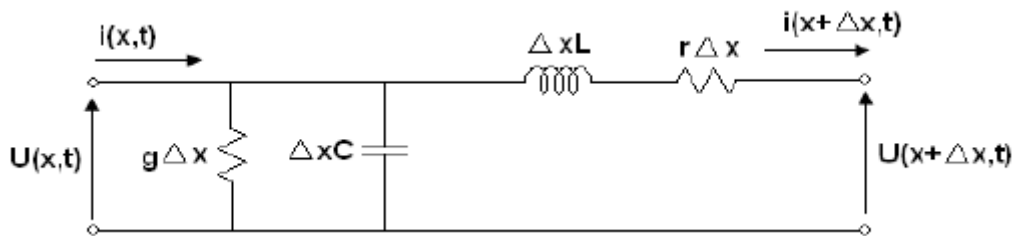


Figura 1 – Circuito Equivalente Monofásico de Linha de Transmissão com Parâmetros Distribuídos. Fonte: (PAZ, 2005)

Como mostrado na Figura 1, a medida em que o comprimento de cada seção Δx se reduz ao infinitesimal dx , se torna satisfeita a aproximação entre os parâmetros concentrados de uma linha à uma linha real (LEMOs, 2008). Com parâmetros distribuídos

e operando em regime permanente, as equações gerais das linhas de transmissão são:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = rgu + (rC + Lg)\frac{\partial u}{\partial t} + LC\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = rgi + (rC + Lg)\frac{\partial i}{\partial t} + LC\frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (2.2)$$

Se a linha for excitada por uma corrente alternada de frequência constante, a tensão (u) e a corrente (i) podem ser definidas como funções senoidais no tempo:

$$u = U_x \text{sen}(wt) \quad (2.3)$$

$$i = I_x \text{sen}(wt) \quad (2.4)$$

Definindo por fasores (dependência implícita de x e t):

$$\dot{U}_x = U_x e^{j\omega t} \quad (2.5)$$

$$\dot{I}_x = I_x e^{j\omega t} \quad (2.6)$$

Substituindo-se as equações 2.5 e 2.6 nas equações 2.1 e 2.2, respectivamente, chega-se à solução geral das expressões para linhas de transmissão, mostradas em 2.7 e 2.8:

$$\dot{U}_x = \frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \dot{Z}_c}{2} e^{x\dot{\gamma}} + \frac{\dot{U}_2 - \dot{I}_2 \dot{Z}_c}{2} e^{-x\dot{\gamma}} [V] \quad (2.7)$$

$$\dot{I}_x = \frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \dot{Z}_c}{2\dot{Z}_c} e^{x\dot{\gamma}} - \frac{\dot{U}_2 - \dot{I}_2 \dot{Z}_c}{2\dot{Z}_c} e^{-x\dot{\gamma}} [A] \quad (2.8)$$

Por meio delas, pode-se relacionar tensões e correntes em qualquer ponto x ao longo da linha, em função das condições do receptor \dot{U}_2 e \dot{I}_2 (FUCHS, 2015).

Escrevendo as equações \dot{A}_1 e \dot{A}_2 em função de constantes, tem-se:

$$\dot{U}_x = \dot{A}_1 e^{x\dot{\gamma}} + \dot{A}_2 e^{-x\dot{\gamma}} [V] \quad (2.9)$$

$$\dot{I}_x = \frac{1}{\sqrt{\frac{\dot{Z}}{\dot{Y}}}} (\dot{A}_1 e^{x\dot{\gamma}} - \dot{A}_2 e^{-x\dot{\gamma}}) \quad (2.10)$$

A função de propagação (γ) e a impedância característica da linha (Z_c), são efetivamente em função da frequência e podem ser definidas por meio das relações 2.11 e 2.12:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{z}\dot{y}} = \sqrt{(r + jwL)(g + jwC)} = \alpha + j\beta \text{ [km}^{-1}\text{]} \quad (2.11)$$

A parte real $e^{\pm\alpha x}$ representa a atenuação das ondas, sendo denominada fator de atenuação e simbolizada por α [néper/km]. A parte imaginária $e^{\pm\beta x}$ determina a variação na posição de fase das ondas de tensão e corrente ao longo da linha, denominada de fator de distorção ou de fase, sendo exibida por β [rad/km].

A impedância característica da linha determina a variação da tensão e corrente no decorrer da linha e não depende do comprimento x , sendo determinada apenas pela característica geométrica:

$$\dot{Z}_c = \sqrt{\frac{\dot{z}}{\dot{y}}} = \sqrt{\frac{r + jwL}{g + jwC}} = Z_c e^{j\gamma} \text{ [ohm]} \quad (2.12)$$

Tendo como base as equações analisadas até o momento, inferi-se a potência característica da linha (P_c) e sua potência natural P_o , como sendo:

$$P_c = \frac{U_2^2}{Z_c} \cos\delta \text{ [W]} \quad (2.13)$$

$$P_o = \frac{U_2^2}{Z_c} \text{ [W]} \quad (2.14)$$

2.2 Análise da Linha em relação a Carga

Em uma linha de transmissão, a potência reativa capacitiva pode ser gerada ou absorvida. A única maneira que a linha não necessita de potência reativa capacitiva adicional é quando ela está conduzindo em sua potência natural P_o , ou seja, está em equilíbrio. A Potência Natural de uma linha é a carga referente de uma LT, para qual ocorre o equilíbrio entre potência capacitiva e indutiva (GORNIC, 2007).

Ao ser transportada uma energia reativa capacitiva maior do que a necessária para efetuar a transmissão da potência ativa, a linha passa a transportar potência ativa em um valor inferior a sua potência natural P_o , resultado no aumento da tensão no receptor em relação ao transmissor. Porém, se a linha estiver transmitindo potência ativa superior a P_o , significa que o reativo indutivo está maior que o necessário para ocorrer o equilíbrio natural entre a potência reativa indutiva com a capacitiva (REZENDE et al., 2013). Os efeitos relacionados à capacitância e indutância, são observados pela equação 2.12 da impedância e pela equação 2.14 da potência natural.

Esclarecendo melhor, quando em alta tensão e levemente carregadas ou à vazio, as linhas de transmissão longas geram uma quantidade significativa de energia reativa.

Em contrapartida, a linha absorve grande quantidade de potência reativa quando está muito carregada. Como resultado, a menos que a linha de transmissão esteja operando em equilíbrio de potência reativa, a tensão no sistema pode não ser mantida em valores nominais, causando perdas de energia e prejudicando o sistema (BOUCHEROT, 1920).

2.2.1 Linha a vazio no Receptor ou com Carga Leve

Um problema crítico nas linhas de transmissão é o aumento da tensão ao longo da linha, fazendo com que a tensão no receptor seja maior do que no transmissor. Este fenômeno é conhecido como “Efeito Ferranti” e tem origem no fluxo de corrente de natureza capacitiva devido às indutâncias em série da linha (ARAÚJO; NEVES, 2005). Esse efeito explica que dependendo da carga ou do sistema a vazio, principalmente, a tensão no receptor da linha pode chegar a valores bem mais alto do que no gerador (FUCHS, 2015). A solução mais usual para o problema do Efeito Ferranti é a compensação da potência reativa ao longo da linha, conectando reatâncias em série e paralelo. O uso desses componentes são indispensáveis quando aplicada em distâncias muito longas (SANTOS, 2010).

Para calcular a tensão do transmissor no caso em que o receptor encontra-se sem carga (a vazio), basta fixar uma tensão no terminal U_2 . Analisando o circuito à vazio, observa-se que a impedância nesse contexto é infinita, tornando a corrente $I_2 = 0$. Com isso, as equações 2.7 e 2.8 resumem-se apenas em 2.15 e 2.16, respectivamente:

$$\dot{U}_x = \frac{\dot{U}_2}{2}(e^{x\dot{\gamma}} + e^{-x\dot{\gamma}}) [V] \quad (2.15)$$

$$\dot{I}_x = \frac{\dot{U}_2}{2\dot{Z}_c}(e^{x\dot{\gamma}} - e^{-x\dot{\gamma}}) [A] \quad (2.16)$$

Para o valor final, é preciso realizar o cálculo de ω , e os parâmetros r , L , C e g da linha precisam ser especificados. A condutância pode ser desprezível sob certas condições, neste caso $g = 0$. Após a realização dos cálculos, o valor da tensão em U_2 tem que ser maior que U_1 nesta condição.

2.2.2 Linha sob Carga no Receptor

Como já dito, a energia armazenada no campo magnético é referente à indutância, e a energia armazenada no campo elétrico é devido à capacitância. De acordo com a relação de energia armazenada em cada campo, elas são exatamente iguais, portanto, cada um dos campos armazena a metade da quantidade de energia que a fonte fornece. Porém, isso só é possível dependendo das condições da extremidade receptora (FUCHS, 2015).

Em um trecho de linha de comprimento Δx , as relações de energia armazenada no campo magnético e no campo elétrico são, respectivamente:

$$\Delta E_m = \frac{I_0^2 L \Delta x}{2} [Ws] \quad (2.17)$$

$$\Delta E_e = \frac{U^2 C \Delta x}{2} [Ws] \quad (2.18)$$

A energia resultante é dada pela soma das energias:

$$\Delta E = \Delta E_m + \Delta E_e [Ws] \quad (2.19)$$

Quando a unidade receptora está sob carga, é preciso observar a característica da impedância da carga Z_2 em relação à impedância característica da linha Z_o , sendo elas: $Z_2 < Z_o$, $Z_2 = Z_o$ e $Z_2 > Z_o$. O equilíbrio entre os campos só é possível quando $Z_2 = Z_o$, caso contrário, o equilíbrio estabelecido será alterado. Analisando as duas outras possíveis características:

- Para Z_2 menor do que Z_o : Neste estado, onde a impedância no receptor é menor que a do transmissor, a corrente que passa pela carga será maior do que a corrente natural da linha, pois corrente e impedância são inversamente proporcionais, como é mostrado na equação abaixo.

$$I = \frac{U}{Z} \quad (2.20)$$

Com isso, se afirma também que a potência dissipada pela carga será maior do que a dissipada pela linha, resultando em um desfalque energético no terminal onde está conectado a carga. Para suprir esse desfalque, a carga absorve energia do campo elétrico armazenado na própria linha. Nesse processo, ocorre um aumento de energia armazenada no campo magnético devido à corrente na carga, porém o campo magnético não cede energia, apenas armazena a energia provinda do campo elétrico. Dessa maneira, ocasionará uma redução da tensão U_2 junto ao receptor, que se reduzirá de forma progressiva até igualar-se à tensão da fonte (FRANCA; GOMES, 2010).

- Para Z_2 maior do que Z_o : Neste caso, a corrente na linha será maior do que a corrente na carga, visto que corrente e impedância são inversamente proporcionais. Consequentemente, a linha irá dissipar mais energia do que a carga, causando um acúmulo de energia no terminal da linha. Como energia não se destrói, o excesso que estava na carga não pode ser absorvido pelo campo magnético já que a corrente na linha está alta e como este campo está diretamente proporcional à corrente, ele

tende a ceder energia para o campo elétrico. A energia acumulada na carga também tende a ser armazenada no campo elétrico, ocorrendo então um aumento de tensão U_2 que se propagará ao longo da linha juntamente com a diminuição de I_o .

2.3 Constantes da Linha - Quadripolos

Em linhas de transmissão de energia elétrica as equações formam um sistema razoavelmente complexo. Desse modo, utilizando o conceito de quadripolos nas análises de circuitos elétricos, a representação de circuitos para uma LT podem ser estudados de forma metódica e uniforme, dotados de quatro terminais (duas entradas e duas saídas). A definição das quatro variáveis que compõe o quadripolo são: tensão de entrada, tensão de saída e suas respectivas correntes (AL., 1989). Sendo duas variáveis constantes e duas independentes, formando seis equações possíveis. A figura 2 representa o modelo em parâmetros ABCD.

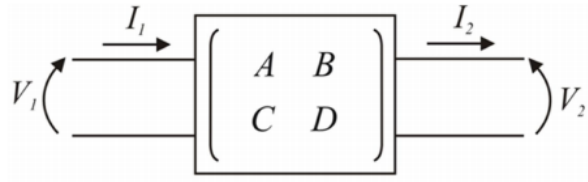


Figura 2 – Representação de um quadripolo pelos parâmetros ABCD. Fonte adaptada: (FUCHS, 2015)

Partindo das equações 2.7 e 2.8, é possível transformá-las nas equações 2.21 e 2.22 respectivamente:

$$\dot{U}_x = \dot{U}_2 \frac{(e^{x\dot{\gamma}} + e^{-x\dot{\gamma}})}{2} + \dot{I}_2 \dot{Z}_c \frac{(e^{x\dot{\gamma}} - e^{-x\dot{\gamma}})}{2} [V] \quad (2.21)$$

$$\dot{I}_x = \dot{I}_2 \frac{(e^{x\dot{\gamma}} + e^{-x\dot{\gamma}})}{2} + \frac{\dot{U}_2 (e^{x\dot{\gamma}} - e^{-x\dot{\gamma}})}{\dot{Z}_c} [A] \quad (2.22)$$

Utilizando a forma exponencial das funções hiperbólicas, as equações 2.21 e 2.22 são escritas de outra forma, vide equação 2.23 e 2.24:

$$\dot{U}_x = \dot{U}_2 \cosh \dot{\gamma} x + \dot{I}_2 \dot{Z}_c \sinh \dot{\gamma} x [V] \quad (2.23)$$

$$\dot{I}_x = \dot{I}_2 \cosh \dot{\gamma} x + \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_c} \sinh \dot{\gamma} x [A] \quad (2.24)$$

Então, a partir disso, é possível definir as equações para o quadripolo, sendo elas equação 2.25 e 2.26.

$$\dot{U}_x = \dot{A}\dot{U}_2 + \dot{B}\dot{I}_2 [V] \quad (2.25)$$

$$\dot{I}_x = \dot{C}\dot{U}_2 + \dot{D}\dot{I}_2 [A] \quad (2.26)$$

Para linhas longas, os elementos A, B, C e D para linhas longas podem ser obtidos comparando as equações 2.25 e 2.26 com as equações 2.23 e 2.24, obtendo-se:

$$\dot{A} = \cosh \dot{\gamma} x \quad (2.27)$$

$$\dot{B} = \sinh \dot{\gamma} x \quad (2.28)$$

$$\dot{C} = \frac{1}{\dot{Z}_c} \sinh \dot{\gamma} x \quad (2.29)$$

$$\dot{D} = \cosh \dot{\gamma} x \quad (2.30)$$

2.4 Compensação de Linhas

Para LT's longas, é necessário o uso de equipamentos de compensação de energia sem alterar as características físicas das linhas, apenas aumentar a capacidade dela de transmitir energia. Equipamentos tais como reatores e capacitores são usados para esse propósito, podendo estes estarem conectados em paralelo ou série (FRANCA; GOMES, 2010).

As linhas em geral, tem um comportamento capacitivo quando operam com carga leve, e quando operam com carga pesada apresentam aspectos indutivos. Neste trabalho, será analisado apenas compensação na linha de transmissão, com banco de capacitores e reatores indutivos. Com a realização da compensação, os valores das constantes da linha, citado na seção anterior, são alterados.

- Os reatores em paralelo ou reatores shunt colocados nas extremidades da linha, são utilizados para diminuir parcialmente os efeitos indutivos da linha, afim de atenuar o Efeito Ferranti (FUCHS, 2015). Para encontrar as novas constantes generalizadas, tem-se para constante A equação 2.31, B equação 2.32, C equação 2.33 e D equação 2.34.

$$\dot{A} = \dot{A}_1 + \dot{B}_1 \dot{Y}_1 \quad (2.31)$$

$$\dot{B} = \dot{B}_1 \quad (2.32)$$

$$\dot{C} = \dot{C}_1 + \dot{A}_1 \dot{Y}_1 + \dot{D}_1 \dot{Y}_1 + \dot{B}_1 \dot{Y}_1 \dot{Y} \quad (2.33)$$

$$\dot{D} = \dot{D}_1 \quad (2.34)$$

- Já para a compensação série é comumente instalados capacitores no meio ou nas extremidades, a fim de compensar os efeitos das reatâncias indutivas para melhorar a estabilidade estática, a regulação de tensão, a distribuição de cargas e as perdas do sistema (FUCHS, 2015). A obtenção dos valores das reatâncias capacitivas são obtidas a partir das equações abaixo, para o meio da linha tem-se a equação 2.35 e para as extremidades da linha a equação 2.36

$$X_c = 2 \frac{(a_1'' b_1' + a_1' b_1'')}{(a_1'')^2 - (a_1')^2} [\Omega] \quad (2.35)$$

$$X_c = 2 \pm \frac{\sqrt{(2 * a_1')^2 + (4c_1'' b_1'')}}{(2c_1'')^2} [\Omega] \quad (2.36)$$

3 Metodologia

A primeira tarefa se refere ao levantamento bibliográfico sobre Linhas de Transmissão e o estudo dos parâmetros de um linha real. Em seguida, uma análise matemática foi necessária para a formulação de equações que descrevam as características dessa linha em cenários distintos. Para a análise dos cenários estudados e para a praticidade dos cálculos, bem como para uma melhor exatidão nas contas, foi utilizando o software *Octave* para a modelagem matemática.

Os experimentos relacionados aos conteúdos da disciplina Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica, já efetuados pelo aluno Alex Gomes Silva ([SILVA, 2017](#)), foram refeitos com uma mudança de 10 indutores para 15 indutores utilizados. Neste caso, uma das bobinas de cada indutor ficou fora de uso.

Posteriormente, foram realizadas as medições necessárias na bancada já construída, a fim de validar sua construção e também os efeitos da linha artificial sob as condições expressas discutidas adiante. Além disso, todos os experimentos realizados em bancada e calculados também foram simulados no software ATP do inglês, *Alternative Transients Program*. Com isso, os resultados calculados, simulados e medidos foram comparados e discutidos.

Os experimentos efetuados foram todos no Laboratório de Eletricidade, situado no Campus do Gama. Todos os testes com a bancada energizada tinham o acompanhamento dos técnicos responsáveis pelo laboratório.

3.1 Caso de Estudo

O objeto de estudo deste trabalho é uma linha de transmissão (LT) de 400 km de comprimento e tensão nominal de 500 kV. Essa LT está situada no trecho São João do Piauí - Milagres, na região do Ceará (CE). Esse trecho pode ser observado na Figura 3, com tracejado em vermelho e apresentado na legenda como Lote B.

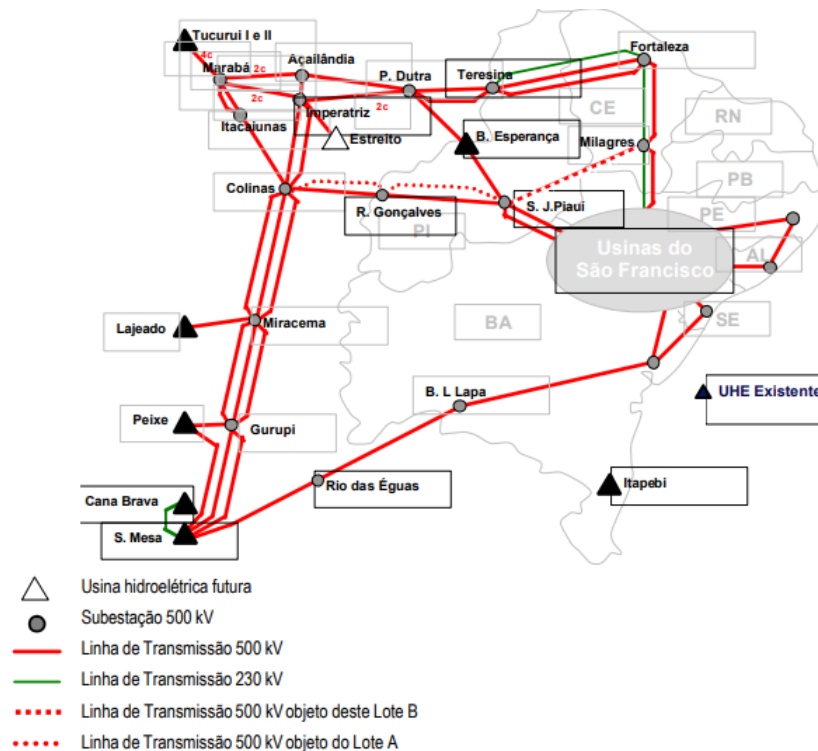


Figura 3 – Mapa da Linha de Transmissão. Fonte: (ANEEL, 2007).

Para a modelagem dessa linha, foi utilizada a representação em parâmetros distribuídos ao longo da LT por várias células conectas em π .

Os parâmetros dessa LT são mostrados na tabela abaixo:

Tabela 1 – Parâmetros LT real

LT	$R[\Omega/km]$	$X[\Omega/km]$	$Y[\mu/km]$
LT Milagres - S. J. Piauí	0,0186	0,016	6,1249

Para a modelagem da LT no ATP, foi utilizada a representação em parâmetros distribuídos ao longo da linha por várias células conectas em π , cada célula representando 80 km distribuídos entre o transmissor e receptor.

Tabela 2 – Parâmetros LT artificial

LT	$R[\Omega]$	$X[\Omega]$	$Y[m\Omega]$
LT artificial	0,0186	7,12	2,4496

3.2 Montagem Laboratorial

A montagem laboratorial dessa linha foi iniciada pelo aluno graduado em Engenharia de Energia, Alex Gomes da Silva, no ano de 2017 (SILVA, 2017). A escolha da LT descrita na Figura 3 teve como justificativa os parâmetros já existentes para um modelo representativo em laboratório e assim uma afirmação dos resultados.

A bancada teste, iniciada pelo aluno citado acima foi elaborada para que os parâmetros da LT artificial fossem o mais próximo possível da LT escolhida, porém não foram encontrados indutores com valores próximos às indutâncias da linha real. A partir disso, foi necessário uma adaptação por meio de transformadores associados a apenas duas bobinas das três existentes nos indutores para obtenção da indutância próxima a requerida. Foi obtido um valor de 20 mH sendo que era preciso 18 mH .

Para todos os testes experimentais, a tensão utilizada foi de 127V monofásico, a qual foi ajustada com utilização de um varivolt, que possui faixa de operação de 0V a 240V . Um banco de resistores variáveis foi ligado aos indutores para simular as cargas conectadas à linha. Logo, foi preciso aplicar 3 tipos de cargas diferentes nele.

O projeto estrutural da bancada, apresentado na Figura 4, foi desenvolvido com o uso do software CATIA. A estrutura é composta por 15 indutores, 5 em cada seção e cada indutor possui um transformador acoplado em cima. O material utilizado para a confecção foi o aço 1010. Foram dispostos 4 rodízios giratórios de silicone com freio para facilitar a movimentação da bancada.

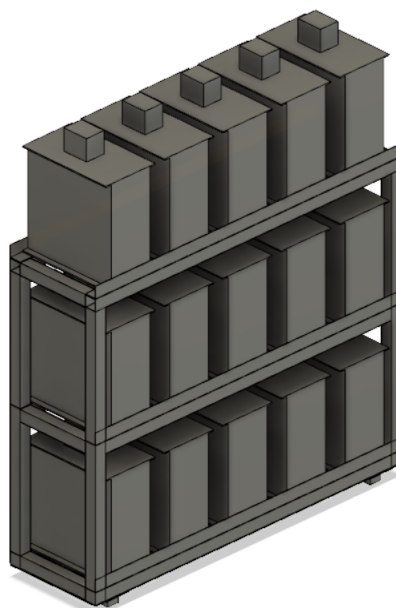


Figura 4 – Projeto Estrutural da Bancada.

3.3 Simulações ATP

O ATPDraw (*Alternative Transients Program*) é um software bastante utilizado para estudos eletromagnéticos, operação em regime transiente, entre outros. Possui várias aplicações e vantagens, podendo modelar satisfatoriamente os sistemas elétricos e reproduzir fielmente seu comportamento, além de expor o diagrama unifilar em um ambiente gráfico.

O ambiente utilizado para a reprodução em ATP do circuito π está representado na Figura 5. A metodologia proposta neste trabalho consiste na modelagem e simulação por meio do software ATP Draw de vários sistemas e cenários para uma linha de transmissão com os mesmos parâmetros da linha de São João do Piauí - Milagres. Porém, os valores de tensão aplicados à fonte do modelo são de acordo com os valores utilizados nos cálculos para o sistema atual.

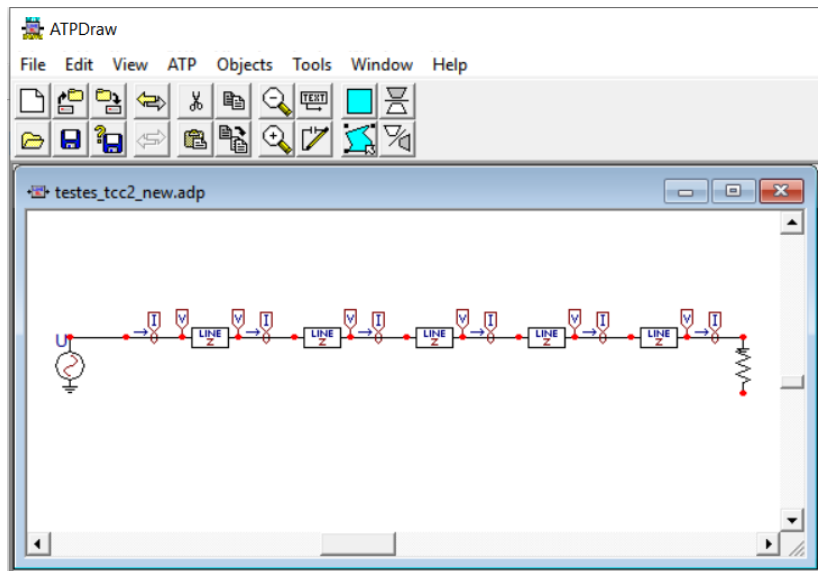


Figura 5 – Linha artificial representada no ATP. Fonte: Elaboração Própria via ATP

4 Resultados

Os cálculos presentes nessa seção foram efetuados com os parâmetros para tensão de saída 127 V e comprimento da LT de 400 km para todos os experimentos. Além disso, para os experimentos Perfil Tensão a Vazio e Perfil Tensão sob Carga, foram calculados as tensões U_1 e correntes I_1 em vários trechos com seções de 80 km começando de 0km até 400km.

Para os três primeiros experimentos, os resultados mostrados nas tabelas desta seção foram calculados manualmente, e posteriormente, implementou-se os cálculos necessários em software *Octave* a fim de agilizar o trabalho. O código está apresentado no Anexo A. No programa, o usuário pode escolher entre os três experimentos que quer simular, bem como poder escolher os parâmetros de U_2 , comprimento da LT e quantidade de seções. Para os cálculos das correntes I_1 e da tensão U_1 , as expressões utilizadas foram 2.8 e 2.7, respectivamente. As distâncias utilizadas correspondem a diferença em quilômetros entre o transmissor e o receptor.

É importante notar que para parâmetros de cálculos a saída foi fixada com 127 V, porém o inverso também é válido, ou seja, a entrada pode ser fixada para encontrar os parâmetros do receptor. Geralmente, o que se tem na prática é um valor de tensão fixo na transmissão e no decorrer da LT dispositivos capazes de suprir as necessidades da linha. Como os cálculos utilizados na disciplina consideram-se o receptor (a saída) como fixo, todas as análises abaixo seguem esse mesmo princípio.

As equações utilizadas aqui, fixam a tensão de saída e encontram o valor dos trechos até a entrada. Logo, em 0 km é a saída e em 400 km é a entrada. Para os cálculos dos erros evidenciados nas subseções, foi utilizado a teoria do erro relativo, vide equação 4.1.

$$Erro_{relativo} = \frac{valor_{calculado} - valor_{medido}}{valor_{calculado}} \quad (4.1)$$

4.1 Efeito Ferranti

Neste experimento, o receptor é deixado sem carga. Com isso, o valor de $I_2 = 0$ e R_2 tende ao infinito. O objetivo é analisar a diferença de tensão entre o receptor (saída) e o transmissor (entrada) com a característica da linha a vazio.

Para a análise do Efeito Ferranti a LT é energizada sem carga e o valor fixado para U_2 é de 127 V, com isso, encontra-se os valores de U_1 e I_1 nos cálculos.

Os resultados teóricos calculados são mostrados na Tabela 3. Observa-se que a tensão na saída (127 V) é maior do que de entrada (U_1) validando o Efeito Ferranti, como já foi explicado.

Tabela 3 – Efeito Ferranti

Variável	Calculado
U_1 [V]	110,75
I_1 [A]	0,298

Para as simulações no software ATP, o circuito foi deixado em aberto e fixada a tensão de entrada $U_1 = 110[V]$. O circuito é mostrado abaixo na Figura 6.

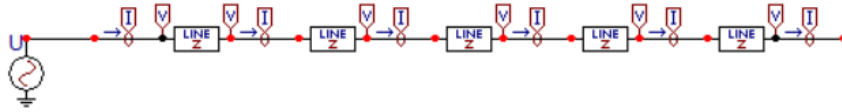


Figura 6 – Representação do Circuito Equivalente Monofásico para a LT de 400 km.
Fonte: Elaboração Própria via ATP

Quando $Z_2 = \infty$, a corrente na LT se reduz, progressivamente, a zero, do receptor para o transmissor. Toda a energia é armazenada no campo elétrico, gerando um aumento da tensão. Temos que a tensão $U_2 = 126,21$ chegando próximo à 127V e caracteriza o denominado “Efeito Ferranti”. Observar a Tabela 4.

Tabela 4 – Efeito Ferranti ATP

Variável	Simulado ATP
U_2 [V]	126,21
I_2 [A]	0

Verificando a Figura 7, é possível perceber o aumento de tensão quando a linha está a 400 km, ou seja, na saída (onda verde).

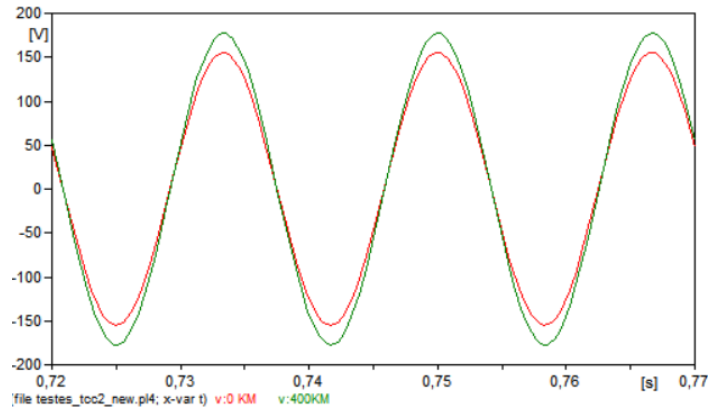


Figura 7 – Representação de onda entre entrada e saída da LT aberta. Fonte: Elaboração Própria via ATP

Para as medições em bancada, a saída da linha foi deixada sem carga. O objetivo é analisar a diferença de tensão entre o receptor (saída) e o transmissor (entrada) com a característica da linha a vazio. Os equipamentos utilizados são listados a seguir:

- Varivolt monofásico V;
- Amperímetro;
- Multímetro.

A linha de transmissão foi energizada sem carga. Foi utilizado um varivolt acoplado à entrada da linha para ajustar a tensão de saída em 127V. Com o uso de um multímetro, foram medidos os valores de tensão e corrente de entrada e de saída da LT.

Observa-se que a tensão na saída é maior do que de entrada validando o Efeito Ferranti, como já foi explicado, pois a tensão de saída é de 127 V, enquanto a de entrada é de aproximadamente 110 V.

Tabela 5 – Efeito Ferranti medição na Bancada

Variável	Bancada
U_1 [V]	110,2
I_1 [A]	0,303

A partir desses dados, é possível analisar que a representação da linha de transmissão para este experimento é fidedigna.

4.1.1 Comparação dos Resultados - Efeito Ferranti

Para uma melhor análise dos dados obtidos para os casos calculados, simulados em ATP e medidos em bancada, na Tabela 6 está agrupado todos resultados.

Tabela 6 – Comparação dos resultados - Efeito Ferranti

Variável	Calculado	Simulado ATP	Bancada
U_1 [V]	110,75	110,3	110,2
I_1 [A]	0,298	0,291	0,303
U_2 [V]	127	126,21	127,2
I_2 [A]	0	0	0,021

Os erros relativos entre os valores calculados em relação aos obtidos em atp e os medidos em bancada, estão na Tabela 7. A partir disso, é possível observar que os erros são bem pequeno tanto nos dados coletados no ATP quanto nos dados obtido na medição.

Tabela 7 – Erros em relação aos valores calculados - Efeito Ferranti

Variável	Erro ATP	Erro Bancada
U_1 [V]	0,406%	0,497%
I_1 [A]	2,349%	1,678%
U_2 [V]	0,622%	0,157%
I_2 [A]	0%	0%

4.2 Perfil Tensão e Corrente a Vazio

Para este caso, a LT continua a vazio, porém o valor de U_1 e I_1 são calculados em trechos distintos da linha, a cada 80 km. Nota-se, na Tabela 8, que quanto mais distante o receptor está do transmissor, maior é a diferença de tensão entre eles. O estudo desse efeito em linhas muito grandes é bastante importante, pois se não tiver nenhum reparo para contornar esse problema, o sistema tende a ficar desequilibrado, como já explicado.

Tabela 8 – Tensão a vazio

[km]	Calculado		Simulado ATP	
	U_1 [V]	I_1 [A]	U_1 [V]	I_1 [A]
400	110,75	0,298	110,3	0,303
320	116,52	0,242	115,95	0,237
240	121,07	0,184	120,41	0,180
160	124,35	0,123	123,62	0,121
80	126,34	0,062	125,56	0,061
0	127	0	126,21	0

Em bancada, a linha de transmissão foi energizada sem carga. Com a utilização de um varivolt, acoplado à entrada da linha, a tensão de saída foi ajustada para 127 V.

Com o uso de um multímetro, foram medidos os valores de tensão e corrente em vários pontos da linha. Como a cada três indutores representam 80 km da linha, então foram realizadas 5 medições.

Observa-se que a tensão na saída é maior do que de entrada validando o Efeito Ferranti, como já foi explicado, pois a tensão de saída é de 127 V, enquanto a de entrada é de aproximadamente 110 V. Os resultados estão exibidos na Tabela 9.

Tabela 9 – Tensão a vazio medição na Bancada

Medido Bancada		
[km]	U_1 [V]	I_1 [A]
400	110,3	0,299
320	117,4	0,212
240	122,3	0,167
160	125,8	0,106
80	127,1	0,044
0	127,2	0,021

Como o esperado, os valores de tensão e corrente para a linha a vazio são bem próximos dos valores calculados. O aumento de tensão e a queda de corrente entre 0 km para 400 km é evidente, caracterizando o Efeito Ferranti.

4.2.1 Comparação dos Resultados - Perfil Tensão e Corrente a Vazio

Os resultados de tensão e corrente obtidos estão agrupados na Tabela 10.

Tabela 10 – Comparação de resultados - Perfil a vazio

[km]	Calculado		Simulado ATP		Medido Bancada	
	U_x [V]	I_x [A]	U_x [V]	I_x [A]	U_x [V]	I_x [A]
400	110,75	0,298	110,3	0,292	110,3	0,303
320	116,52	0,242	115,95	0,237	117,4	0,212
240	121,07	0,184	120,41	0,180	122,3	0,167
160	124,35	0,123	123,62	0,121	125,8	0,106
80	126,34	0,062	125,56	0,061	127,1	0,044
0	127	0	126,21	0	127,2	0,021

A Tabela 11 relaciona os erros relativos dos valores obtido em ATP e medidos em bancada com os resultados calculados. Ao analisar a tabela de erros, nota-se que os resultados de corrente e tensão para os dois casos seguem aproximados aos valores calculados. Os erros com margens maiores de 10% são de correntes medidas em bancada, apesar de estar na mesma ordem de grandeza das correntes calculadas, como são valores bem pequenos, qualquer diferença entre os resultados é bem grande quando colocado em porcentagem.

Tabela 11 – Erros em relação aos valores calculados - Perfil a vazio

[km]	Simulado ATP		Medido Bancada	
	U_x [V]	I_x [A]	U_x [V]	I_x [A]
400	0,406%	2,349%	0,497%	1,678%
320	0,489%	2,066%	0,755%	12,397%
240	0,519%	2,174%	1,016%	35,772%
160	0,587%	1,626%	1,167%	13,821%
80	0,617%	1,613%	0,602%	29,032%
0	0,622%	0%	0,157%	0%

4.3 Perfil Tensão e Corrente sob Carga

Para este experimento, foram considerados três tipos de cargas, sendo elas com: metade da Potência Natural ($0,5 * P_o$), Potência Natural (P_o) e 1,5 da Potência Natural ($1,5 * P_o$). As equações utilizadas para o entendimento dos cálculos foram as equações 2.7 e 2.8.

A modelagem no ATP é mostrada na Figura 8, o que varia em relação a potência é a o valor da resistência para cada caso.

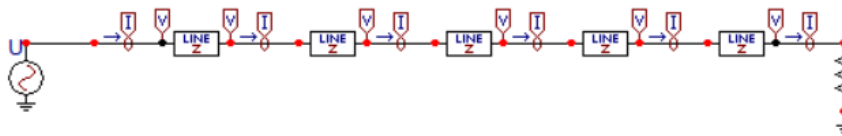


Figura 8 – Circuito Equivalente Monofásico sobcarga. Fonte: Elaboração Própria via ATP

Os equipamentos utilizados para efetuar os estes experimentos estão listados a seguir:

- Varivolt monofásico V;
- Amperímetro;
- Multímetro;
- Banco de Resistência.

4.3.1 Linha operando a 50% da Potência Natural

A Tabela 12 mostra os dados da tensão U_1 e corrente I_1 referentes ao transmissor e para quando a carga $Z_o < Z_2$, neste caso, $Z_2 = 417,61[\Omega]$. A carga está com 0,5 da

Potência Natural ($38,6224[V A]$) e isso reflete deixando a tensão de entrada (U_1) menor do que a de saída (U_2) a medida que o tamanho da linha aumenta, caracterizando o Efeito Ferranti. A corrente (I_1), para compensar, diminui quanto maior for o tamanho da LT.

Tabela 12 – 0,5 da Potência Natural: $Z_2 = 417,61 \Omega$

[km]	Calculado		Simulado ATP	
	U_1 [V]	I_1 [A]	U_1 [V]	I_1 [A]
400	116,28	0,407	115,70	0,390
320	120,19	0,376	117,39	0,363
240	123,28	0,349	122,31	0,338
160	124,55	0,326	124,25	0,318
80	126,73	0,311	125,20	0,304
0	127	0,304	125,17	0,300

A forma de onda para $Z_2 = 417,61 \Omega$ é mostrada na Figura 9.

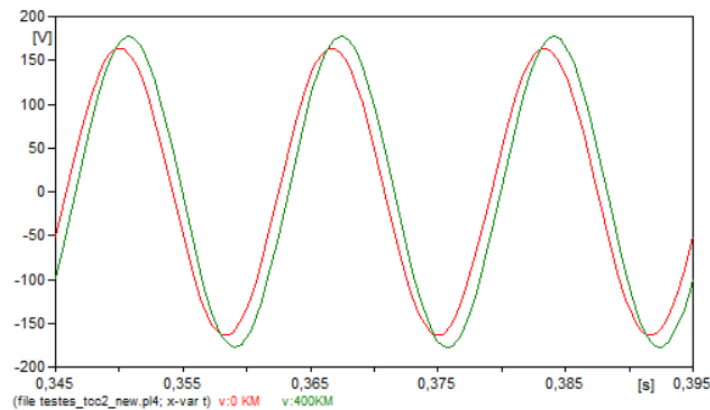


Figura 9 – Representação de onda para linha operando a $0,5 * P_0$. Fonte: Elaboração Própria via ATP

Para os testes em bancada, o varivolt foi acoplado na entrada da linha, e com um multímetro na saída da linha verificava-se a tensão a medida que ajustava o varistor até o valor de $127 [V]$ na saída. Depois, com outro multímetro foi realizado a medição de tensão a cada 3 indutores ou a cada 80 km da linha. Também foi medida a corrente com o amperímetro nos mesmos trechos.

A carga varia de acordo com o valor da resistência imposta no final da linha. Para $0,5 * P_0$ o valor é de $R = 417,61 [\Omega]$. De acordo com a Tabela 13, os valores de tensão e correntes medidos na bancada confirma o Efeito Ferranti, pois a tensão na entrada é de $122,63 [V]$ e na saída é de $127 [V]$, a corrente por sua vez tem uma pequena diminuição.

Tabela 13 – Medição para 0,5*Potência Natural: $Z_2 = 417,61 \Omega$

Medido Bancada		
[km]	U_1 [V]	I_1 [A]
400	122,63	0,506
320	123,50	0,487
240	124,38	0,468
160	125,25	0,455
80	126,25	0,442
0	127	0,423

4.3.1.1 Comparação dos Resultados - Perfil Tensão e Corrente a 50% da P_0

Os resultados calculados, os simulados via ATP e os medidos em bancada estão dispostos na Tabela 14.

Tabela 14 – Comparação de resultados - Perfil a 0,5* P_0

[km]	Calculado		Simulado ATP		Medido Bancada	
	U_x [V]	I_x [A]	U_x [V]	I_x [A]	U_x [V]	I_x [A]
400	116,28	0,407	115,70	0,390	122,63	0,506
320	120,19	0,376	117,39	0,363	123,50	0,487
240	123,28	0,349	122,31	0,338	124,38	0,468
160	124,55	0,326	124,25	0,318	125,25	0,455
80	126,73	0,311	125,20	0,304	126,25	0,442
0	127	0,304	125,17	0,300	127	0,423

Os erros obtidos para os resultados simulados em ATP e os medidos em bancada, são referentes aos valores calculados em teoria. Para tanto, a Tabela 15 apresenta esses dados. Observa-se que os valores das correntes medidos em bancada, apresentam erros expressivos em relação aos outros erros. Isso pode ter acontecido justamente por causa do parâmetro da indutância utilizada na linha artificial, já que ela não era exatamente a mesma da linha real.

Tabela 15 – Erros em relação aos valores calculados - 0,5* P_0

[km]	Simulado ATP		Medido Bancada	
	U_x [V]	I_x [A]	U_x [V]	I_x [A]
400	0,499%	4,18%	5,46%	24,32%
320	2,33%	3,46%	2,75%	29,52%
240	0,787%	3,15%	0,892%	34,10%
160	0,241%	2,45%	0,562%	39,57%
80	1,21%	2,25%	0,379%	42,12%
0	1,44%	1,32%	0%	39,14%

4.3.2 Linha Operando a Potência Natural

Com a carga operando à Potência Natural, sendo ela $77,2448VA$, a Tabela 16 apresenta os dados de tensão e corrente do transmissor, onde $Z_o = Z_2$, que equivalem a $208,8[\Omega]$. Percebe-se que a tensão no receptor e no transmissor são próximas mesmo quando a LT chega aos 400 km, há apenas um pequeno aumento de tensão.

Tabela 16 – Potência Natural: $Z_2 = 208,80 \Omega$

[km]	Calculado		Simulado ATP	
	U_1 [V]	I_1 [A]	U_1 [V]	I_1 [A]
400	129,28	0,619	129,8	0,60252
320	128,82	0,617	128,91	0,60201
240	128,36	0,615	128,01	0,60175
160	127,91	0,612	127,12	0,60153
80	127,45	0,610	126,23	0,60181
0	127	0,608	125,33	0,60184

Na Figura 10 é notório que o pico de da onda de 0 km (vermelha) e da onda de 400km (verde) possuem praticamente o mesmo valor de pico. Isso acontece devido a operação da linha em sua potência natural. Há apenas uma pequena queda de tensão.

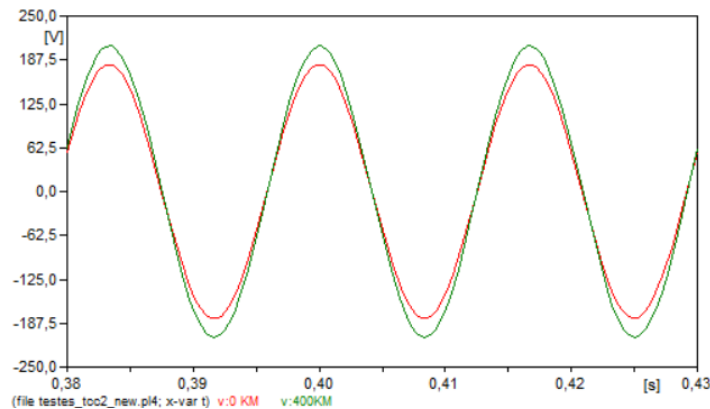


Figura 10 – Representação de onda para linha operando a P_0 . Fonte: Elaboração Própria via ATP

Os valores de tensão e corrente medidos em bancada estão dispostos na Tabela 17. Os resultados de tensão evidenciam um queda de tensão entre os terminais de entrada e saída.

Tabela 17 – Medição para Potência Natural: $Z_2 = 208,80 \Omega$

Medido Bancada		
[km]	U_1 [V]	I_1 [A]
400	167,10	0,608
320	159,60	0,630
240	156,90	0,633
160	145,70	0,650
80	129,50	0,617
0	127	0,619

4.3.2.1 Comparação dos Resultados - Perfil Tensão e Corrente a P_0

A Tabela 18 apresenta todos dados coletados em cálculo teórico, simulado em ATP e medidos em bancada.

Tabela 18 – Comparação de resultados - Perfil a P_0

[km]	Calculado		Simulado ATP		Medido Bancada	
	U_x [V]	I_x [A]	U_x [V]	I_x [A]	U_x [V]	I_x [A]
400	129,28	0,619	129,8	0,60252	167,10	0,608
320	128,82	0,617	128,91	0,60201	159,60	0,630
240	128,36	0,615	128,01	0,60175	156,90	0,633
160	127,91	0,612	127,12	0,60153	145,70	0,650
80	127,45	0,610	126,23	0,60181	129,50	0,617
0	127	0,608	125,33	0,60184	127	0,619

Os erros contidos na Tabela 19 são relativos aos valores calculados em teoria. Observa-se que os valores mais divergentes dos valores calculados são os de tensão medidos em bancada.

Tabela 19 – Erros em relação aos valores calculados - Perfil a P_0

[km]	Simulado ATP		Medido Bancada	
	U_x [V]	I_x [A]	U_x [V]	I_x [A]
400	0,401%	2,67%	29,14%	1,78%
320	0,070%	2,43%	23,89%	2,11%
240	0,273%	2,15%	22,23%	2,93%
160	0,618%	1,71%	13,91%	6,21%
80	0,957%	1,34%	1,61%	1,15%
0	1,31%	1,01%	0%	1,81%

4.3.3 Linha Operando a 150% da Potência Natural

Neste caso, a carga está operando com $1,5P_o$ (115, 867VA), ou seja, Z_2 menor que Z_o . Para tal, $Z_2 = 139,2[\Omega]$. Isso resulta em um aumento da corrente e um redução do nível de tensão entre o ponto de entrada e o de saída.

Tabela 20 – 1,5 da Potência Natural: $Z_2 = 139,2 \Omega$

[km]	Calculado		Simulado ATP	
	U_1 [V]	I_1 [A]	U_1 [V]	I_1 [A]
400	147,79	0,861	147	0,8363
320	141,51	0,880	141,23	0,8566
240	135,99	0,895	135,37	0,8731
160	131,57	0,906	130,49	0,8859
80	128,50	0,912	126,84	0,8921
0	127	0,912	124,66	0,8954

Por fim, a Figura 11 evidencia uma queda de tensão bem acentuada na saída da linha.

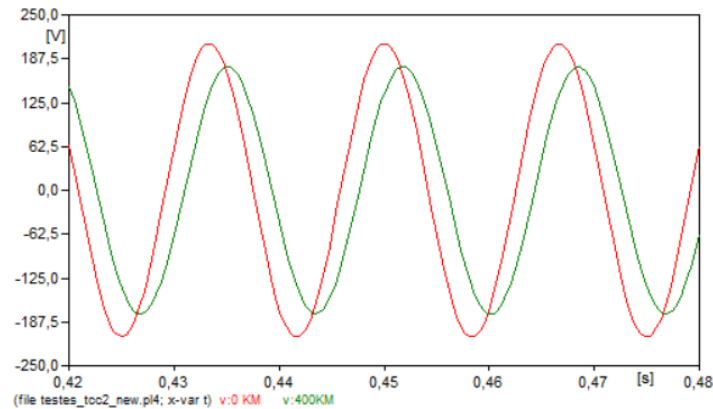


Figura 11 – Representação de onda para linha operando a $1,5P_0$. Fonte: Elaboração Própria via ATP

Em bancada, os valores de tensão e corrente medidos estão dispostos na Tabela 21. Com a linha operando a 1,5 da potência natural, a tendência é uma queda de tensão do transmissor para o receptor. Esse fato foi evidenciado na medição. Os valores de corrente medidos na bancada são menores do que os valores calculados.

Tabela 21 – Medição para 1,5 da Potência Natural: $Z_2 = 139,2 \Omega$

Medido Bancada		
[km]	U_1 [V]	I_1 [A]
400	148,4	0,468
320	147,8	0,433
240	145,9	0,430
160	134,1	0,435
80	128,2	0,422
0	127,5	0,400

4.3.3.1 Comparação dos Resultados - Perfil Tensão e Corrente a 150% da P_0

Para uma melhor análise comparativa dos dados, a Tabela 22 dispõem de todos os valores calculados, simulados em ATP e medidos em bancada.

Tabela 22 – Comparação de resultados - Perfil a $1,5 * P_0$

[km]	Calculado		Simulado ATP		Medido Bancada	
	U_x [V]	I_x [A]	U_x [V]	I_x [A]	U_x [V]	I_x [A]
400	147,79	0,861	147	0,8363	148,4	0,468
320	141,51	0,880	141,23	0,8566	147,8	0,433
240	135,99	0,895	135,37	0,8731	145,9	0,430
160	131,57	0,906	130,49	0,8859	134,1	0,435
80	128,50	0,912	126,84	0,8921	128,2	0,422
0	127	0,912	124,66	0,8954	127,5	0,400

Nota-se, a partir da Tabela 23 que os valores de corrente medidos têm-se um erro bastante expressivo em relação aos valores calculados. Isso pode ser por causa dos indutores escolhidos, já que eles não representam exatamente os valores necessários de indutância da linha real.

Tabela 23 – Erros em relação aos valores calculados - Perfil a $1,5 * P_0$

[km]	Simulado ATP		Medido Bancada	
	U_x [V]	I_x [A]	U_x [V]	I_x [A]
400	0,534%	2,67%	0,414%	45,64%
320	0,198%	2,43%	4,44%	50,79%
240	0,456%	2,15%	7,29%	51,95%
160	0,821%	1,71%	1,92%	51,99%
80	1,29%	1,34%	0,233%	53,73%
0	1,84%	1,01%	0,394%	56,14%

4.3.4 Análise Geral

Os gráficos mostrados nas Figuras 12 e 13, são referentes a tensões e correntes, respectivamente, e para as diferentes potências e comprimentos da LT. Foram plotados em Excel e apresentam as curvas para os três tipos de cargas discutidos nos tópicos de Perfil Tensão e Corrente sob carga. O plot foi realizado usando os valores das Tabelas 12, 16 e 20 para os valores calculados.

Observando a Figura 12, percebe-se que a tensão para $0,5 * P_0$ aumenta a medida que a distância entre o transmissor (400 km) e o receptor (0km) se distanciam. Já para quando a linha opera a P_0 , não há muita diferença de tensão entre o transmissor e o receptor. Por fim, quando a linha opera com $1,5 * P_0$ a tensão diminui entre o transmissor e o receptor.

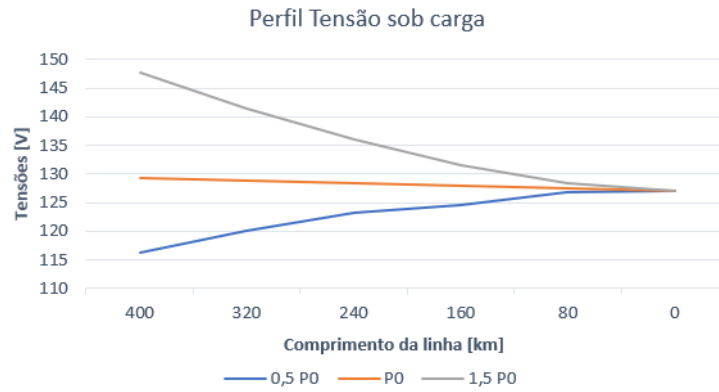


Figura 12 – Tensões U_1 para diferentes potências x Comprimento da LT. Fonte: Elaboração Própria.

Analisando o gráfico da Figura 13, percebe-se que quando a potência está 1,5 da Potência Natural, a corrente diminui a medida que a LT vai aumentando. E para a $0,5 \cdot P_0$ a corrente vai aumentando conforme a linha vai ficando maior. Já quando a carga opera com a Potência Natural, esta tende a não sofrer muitas variações.

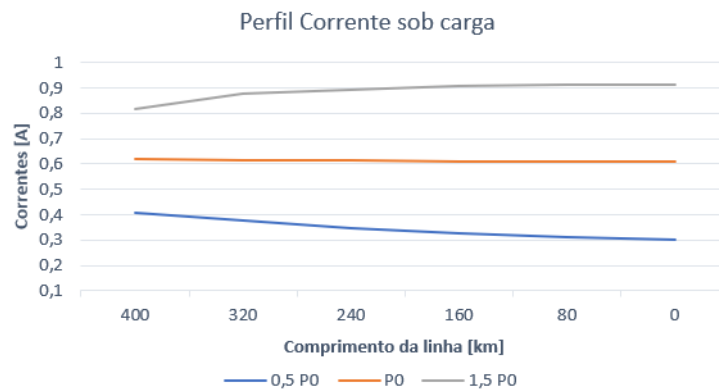


Figura 13 – Correntes I_1 para diferentes potências x Comprimento da LT. Fonte: Elaboração Própria.

4.4 Quadripolos - Constantes da LT

As constantes generalizadas de uma linha de transmissão, como de qualquer quadripolo, podem ser obtidas através de medidas efetuadas diretamente em seus terminais. Para conseguir esses valores será utilizado o software ATP. Deve-se realizar de forma simultânea as medidas no receptor e no transmissor quando a linha opera em curto-circuito e em vazio.

- Para o ensaio com o receptor a vazio, a linha é representada como na Figura 14 e tem-se $I_2 = 0$.

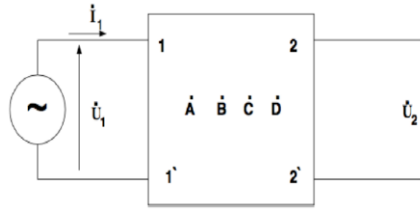


Figura 14 – Representação do circuito com receptor aberto. Fonte: (FUCHS, 2015)

A modelagem no ATP foi realizada como na Figura 15 :

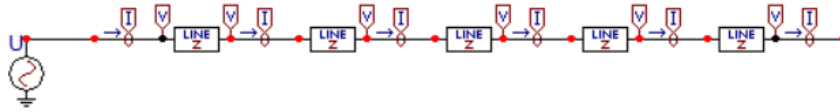


Figura 15 – Representação no ATP do circuito com receptor a vazio. Fonte: Elaboração Própria via ATP

A tensão e corrente de entrada foram medidas, e posteriormente aplicou-se os valores encontrados de U_{10} e I_{10} na equação 4.2, a fim de determinar \dot{Z}_{110} :

$$\frac{U_{10}}{I_{10}} = \frac{\dot{A}}{\dot{C}} = \dot{Z}_{110} \quad (4.2)$$

U_{10} : Tensão da linha a vazio;

I_{10} : Corrente da linha a vazio;

\dot{Z}_{110} : Impedância de admissão no transmissor quando a linha está aberta junto ao receptor.

- Para ensaio com o receptor em curto-circuito, a representação da linha é mostrada na Figura 16 e temos $U_2 = 0$ e mede-se U_{1cc} e I_{1cc} .



Figura 16 – Representação do circuito com receptor em curto. Fonte: (FUCHS, 2015)

A modelagem no ATP foi realizada como na Figura 17:

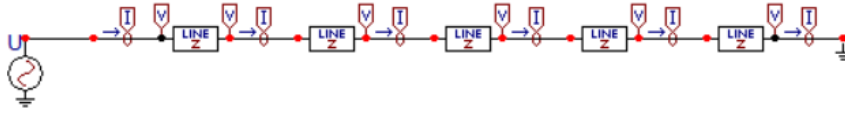


Figura 17 – Representação no ATP do circuito com receptor em curto. Fonte: Elaboração Própria via ATP

A equação 4.3 é utilizada para encontrar os parâmetros em questão.

$$\frac{U_{1cc}}{I_{1cc}} = \frac{\dot{B}}{\dot{D}} = \frac{\dot{B}}{\dot{A}} = \dot{Z}_{11cc} \quad (4.3)$$

U_{1cc} : Tensão da linha em curto-circuito;

I_{1cc} : Corrente da linha em curto-circuito;

\dot{Z}_{11cc} : impedância de admissão no transmissor quando a linha está em curto-circuito junto ao receptor.

Mediante as relações e valores das impedâncias, pode-se correlaciona-los com as seguintes equações para a obtenção das constantes da linha. Sabendo que:

$$\dot{Z}_{11cc} = \frac{\dot{B}}{\dot{A}} \quad (4.4)$$

A contante \dot{C} pode ser calculada por meio da equação 4.5.

$$\dot{C} = \frac{1}{\sqrt{(\dot{Z}_{11cc}(\dot{Z}_{110} - \dot{Z}_{11cc}))}} \quad (4.5)$$

Logo, para a constante A , tem-se que:

$$\dot{A} = \dot{Z}_{110} * \dot{C} = \dot{D} \quad (4.6)$$

Por fim, a constante B :

$$\dot{B} = \dot{Z}_{11cc} * \dot{A} \quad (4.7)$$

Para as constantes encontradas por meio das análises no ATP, foi preciso fazer os testes de curto circuito e circuito a vazio, tanto no receptor quanto no transmissor. Os dados de tensão e corrente foram coletados. Portanto, as equações utilizadas foram as da equação 4.3 a equação 4.7.

Já para encontrar os valores teóricos, ou seja, os calculados, as equações utilizadas foram da equação 2.27 a equação 2.30.

Os parâmetros encontrados, tanto nos cálculos como nas simulações estão presentes na Tabela 24.

Tabela 24 – Constantes da LT

Parâmetro	Calculado	Simulado ATP
A	$0,872049 \angle 0,57^\circ$	$0,876307 \angle -1,44^\circ$
B	$102,452 \angle 86,19^\circ$	$102,771 \angle 84,39^\circ$
C	$0,00234418 \angle 90,18^\circ$	$0,002316 \angle 84,10^\circ$
D	$0,872049 \angle 0,57^\circ$	$0,876307 \angle -1,44^\circ$
Z_{11cc}	$117,484 \angle 85,62^\circ$	$117,289 \angle 84,02^\circ$
Z_{110}	$372,005 \angle -89,60^\circ$	$378,168 \angle -82,51^\circ$

Nesta etapa, os experimentos foram efetuados em bancada. Para isto, foram realizados dois testes, sendo eles a vazio e de curto circuito. O propósito é a obtenção dos valores das constantes generalizadas da linha a partir das medições coletadas na bancada. Os equipamentos utilizados neste experimento estão listados a seguir:

- Varivolt monofásico [V];
- Amperímetro;
- Multímetro;
- Banco de Resistência variável;
- Cossefímetro.

Primeiramente, neste experimento, foi colocado a saída do circuito em curto. Com o varivolt conectado na entrada da linha, a tensão foi variada até encontrar um valor de corrente próximo a 1 [A] na entrada da linha. Depois, a tensão e a corrente de entrada foram medidas. Posteriormente, os terminais de saída da linha foram deixados a vazio, sem alterar o valor do varivolt e mediu-se a tensão e corrente de entrada.

Os valores medidos estão mostrados na Tabela 25.

Tabela 25 – Resultados testes na Bancada

Parâmetro	Valor	Ângulo Cossefímetro
$U_{1cc}[V]$	134,2	0,91 ind
$I_{1cc}[A]$	1,007	0,91 ind
$U_{10}[V]$	128,8	0,5 cap
$I_{10}[A]$	0,347	0,5 cap

A partir da análise dos dados obtidos na Tabela acima e por meio de manipulações de equações, foi possível encontrar os valores das constantes da linha, vide Tabela 26.

Tabela 26 – Constantes da Linha - Medição Bancada

Parâmetro	Calculado Bancada
A	0,856383 $\angle 0,00^\circ$
B	114,128 $\angle 24,49^\circ$
C	0,00230718 $\angle 60^\circ$
D	0,856383 $\angle 0,00^\circ$
Z_{11cc}	133,267 $\angle 24,49^\circ$
Z_{110}	371,182 $\angle -60^\circ$

4.4.1 Comparação dos Resultados

Para uma melhor análise dos resultados, segue a Tabela 27.

Tabela 27 – Comparação de resultados - Constantes da LT

Parâmetro	Calculado	Simulado ATP	Medido Bancada
A	0,872049 $\angle 0,57^\circ$	0,876307 $\angle -1,44^\circ$	0,856383 $\angle 0,00^\circ$
B	102,452 $\angle 86,19^\circ$	102,771 $\angle 84,39^\circ$	114,128 $\angle 24,49^\circ$
C	0,00234418 $\angle 90,18^\circ$	0,002316 $\angle 84,10^\circ$	0,00230718 $\angle 60^\circ$
D	0,872049 $\angle 0,57^\circ$	0,876307 $\angle -1,44^\circ$	0,856383 $\angle 0,00^\circ$
Z_{11cc}	117,484 $\angle 85,62^\circ$	117,289 $\angle 84,02^\circ$	133,267 $\angle 24,49^\circ$
Z_{110}	372,005 $\angle -89,60^\circ$	378,168 $\angle -82,51^\circ$	371,182 $\angle -60^\circ$

Os erros mostrados na Tabela 28 são referentes aos valores calculados. Nota-se que o maior erro é identificado na medição em bancada para o valor de Z_{11cc} , sendo ele de aproximadamente 13%.

Tabela 28 – Erros em relação aos valores calculados - Constantes da LT

Parâmetro	Simulado ATP	Medido Bancada
A = D	0,488%	1,796%
B	0,311%	11,396%
C	1,202%	1,578%
Z_{11cc}	0,166%	13,434%
Z_{110}	1,657%	0,221%

Analisando e comparando os valores dos cálculos teóricos versus os coletados a partir da bancada, é notório que o valor das fases são próximos, porém os valores dos ângulos são bem diferentes. Essa diferença na angulação se deve ao fato de que o cossefímetro utilizado não era adequado para a medição de arccosseno menores do que 0,5. Além disso, os parâmetros reais da linha artificial não são exatamente os mesmos da linha real, devido o valor do capacitor utilizado e a associação dos indutores.

5 Considerações Finais

O objetivo deste trabalho foi o aprimoramento de uma bancada didática que simula uma linha de transmissão real. A bancada foi montada em laboratório e foram realizados experimentos para validá-la. Como os experimentos já estavam elaborados, neste trabalho houve-se o refinamento dos métodos e dos resultados para cada análise, além da confecção da estrutura e do remanejamento de 10 indutores para 15.

Foram refeitos os experimentos de Efeito Ferranti, Perfil Tensão e Corrente a Vazio, Perfil Tensão e Corrente sob 3 tipos de cargas e por fim, os testes para Quadripolos. Todos estes testes foram efetuados em laboratório e com a utilização dos 15 indutores instalados na estrutura da bancada. Para todos os casos foram apresentados os cálculos teóricos, as simulações em ATP e as medições em bancada. Portanto, têm-se três tipos de resultados para cada análise da linha artificial.

O primeiro teste em bancada foi o de Efeito Ferranti, que é basicamente a observação da elevação de tensão na saída da linha em relação a entrada. O Perfil Tensão e Corrente a vazio é exatamente igual ao de Efeito Ferranti, porém, as medições são realizadas em 5 trechos da LT ao invés de apenas na entrada e saída. Nestes dois casos, houveram resultados bastantes convergentes entre os 3 tipos de análises. Os resultados coletados nas medições e em ATP obtiveram erros inferiores a 3% quando comparados aos resultados calculados. A bancada foi validada para este experimento.

Para o estudo do Perfil e Tensão sob carga, a linha foi submetida a três situações diferentes de cargas. Para a linha operando a 50% da potência natural, os resultados de tensão obtidos em bancada demonstraram erros de no máximo 5,5% quando comparados aos valores teóricos. Porém, os resultados de corrente para a mesma observação, resultaram em erros de até 42,12%. Os resultados reservados em ATP obtiveram erros de no máximo 4,18%, sendo este erro em uma medição de corrente.

Os erros de tensão encontrados para a linha operando em potência natural, tiveram uma distorção máxima de 29,14% em relação aos valores calculados. Já para as correntes, o erro máximo foi de aproximadamente 6%. Para os valores de tensão e corrente em ATP, o erro máximo foi de 2,67% em uma medição de corrente para a mesma análise de valores calculados.

Quando a linha foi submetida a uma carga que resultou em uma potência 150% maior do que a natural, os resultados de tensão medidos em bancada obtiveram um erro máximo de 7,29% em consequência aos valores calculados. Já para os valores encontrados de corrente, estes erros são entre 50%. Em ATP, esses erros não passam de 3% tanto para corrente quanto para tensão. Todos os erros são em relação aos resultados calculados de

acordo com a teoria.

Por último, as observações coletadas em bancada para o teste a vazio e o teste em curto circuito, que determinam as constantes da linha, resultaram em um erro máximo de aproximadamente 11,4% para a constante B; e as constantes A, D e C o erro não passou de 2% em relação aos valores calculados. O valor da impedância encontrada em curto circuito também registrou em erro maior do que 10%. Para os resultados em ATP, o maior valor de erro não chegou a 2% para as constantes e para as impedâncias nos testes.

Concluindo, os resultados analisados em ATP os erros de nenhum experimento chegou a 5% em relação aos valores obtidos em teoria. Isso se deve a uma construção via software que mais satisfaz as preceitos teóricos, sem outros internos, como uma maior resistência devido aos cabos e conexões. Já as análises tomadas referentes aos valores medidos em bancada, os erros apresentados em alguns experimentos foram mais de 50%, principalmente nas medições de corrente. Isso pode ser devido a indutância da linha construída em bancada que, como explicado na seção de metodologia, não foi possível chegar a um valor exatamente igual ao da linha real.

Para trabalhos futuros, sugere-se a criação de experimentos com a finalidade de estudar compensação em uma LT e as novas constantes pós compensação. Por fim, um levantamento de recursos para a finalização completa da bancada.

Referências

- ABRADEE, A. B. de Distribuidores de E. E. *Setor Elétrico Redes de Energia Elétrica*. 2017. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica>>. Citado na página 17.
- AL., N. et. L. L. *Using a personal computer to teach power system trasients*. *IEEE Transactions on Power Systems*. [S.l.: s.n.], 1989. Citado na página 24.
- ANEEL, A. N. de E. E. *ANEXO 6B LOTE B LINHA DE TRANSMISSÃO 500 kV SÃO JOÃO DO PIAUÍ – MILAGRES. CARACTERÍSTICAS E REQUISITOS TÉCNICOS BÁSICOS DAS INSTALAÇÕES DE TRANSMISSÃO*. 2007. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 28.
- ARAÚJO, A. D.; NEVES, W. *Cálculo de Transitórios eletromagnéticos em Sistemas de Energia*. [S.l.: s.n.], 2005. Citado na página 22.
- BOUCHEROT, P. *Éxistence de Deux Régimes en ferro-résonance*. [S.l.: s.n.], 1920. Citado na página 22.
- ENGINEERING, C. for E. P. C. *A Modern Power Engineering Curriculum that Exhibits the Effects of Information Technology, Center for Electric Power Engineering*. 2006. Disponível em: <<http://www.amanogawa.com/transmission.html>>. Citado na página 17.
- FONSECA, T. C. da. Estudo da energização, curto e de situações de carga que ocorrem na linha de transmissão jaquera-taqueril. Universidade Federal De Viçosa, 2010. Citado na página 17.
- FRANCA, A. A. da; GOMES, F. J. Linhas de transmissão: Cálculo, projeto e análise sem complicações. Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia Programa de Educação Tutorial da Engenharia Elétrica, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 25.
- FUCHS, R. D. *Transmissão de Energia Elétrica - Linhas Aéreas*. [S.l.: s.n.], 2015. v. 3. Citado 7 vezes nas páginas 7, 20, 22, 24, 25, 26 e 44.
- GORNIC, C. Análise de desempenho de linhas de transmissão incluindo condutores geminados e cabos pára-raios. Escola Politécnica da Univerdidade do Rio de Janeiro, 2007. Citado na página 21.
- JOHNSON, W. C. *Linhas de Transmissão e Circuitos*. [S.l.: s.n.], 1980. Citado na página 19.
- LEMONS, J. R. F. Modelagem de linhas de transmissão trifásica para estudo de transitórios eletromagnéticos. Universidade do Rio de Janeiro, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 19.
- LIMA, A. C. S.; PEREIRA, M. P. Análise comparativa dos modelos de linha de transmissão para emtp. xvi seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica. XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Campinas, 2001. Citado na página 19.

PAZ, M. A. Modelo reduzido de linhas de transmissão para transitórios eletromagnéticos - aplicação de propriedades complexas. Universidade Estadual de Campinas, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 19.

RAU, N. S. *Optimization Principles: Practical Applications to the Operation and Markets of the Electric Power Industry*. [S.l.: s.n.], 2003. Citado na página 17.

REZENDE, P. et al. Compensação de reativos em linhas de transmissão utilizando compensadore estáticos fixos. Conferência de Estudo em Engenharia, 2013. Citado na página 21.

SANTOS, M. Avaliação do desempenho de linhas de transmissão de energia elétrica de meia onda. Universidade de São Paulo, 2010. Citado na página 22.

SILVA, A. G. da. Bancada para simulação de linha de transmissão. Universidade de Brasília, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 18, 27 e 29.

Anexos

ANEXO A – Código 1

```

1
2     clc;
3     clear all;
4     close all;
5
6     %Dados da linha
7     r = 0.0186;
8     x = 0.267i;
9     c = 6.1240E-6i;
10    g = 0;
11    %L=tamanho da linha
12
13    %Calculos
14    z = r + x*2*pi;
15    y = g + c*2*pi;
16    Zc = sqrt(z/y);
17    gama = sqrt((r+x)*(g+c));
18
19    fprintf('Experimentos \n 1.Efeito Ferranti \n 2.Perfil
        de tensao e corrente a vazio \n 3.Perfil de tensao
        e corrente sob carga\n\n');
20    exper = input('Escolha o experimento: ');
21
22    %tensao de saida
23    U2 = input('Digite a tensao de saida [V]: ');
24    L = input('Digite o comprimento da linha [km]: ');
25
26    %casos para os tipos de operacoes
27    switch exper
28
29        case 1 %Efeito Ferranti
30            I2=0; %Z2 tende ao infinito
31
32    %Tensao de entrada
33    U1 = [((U2+(I2*Zc))/2)*exp(gama*L)] + [((U2-(I2*Zc))/2)

```

```

*exp(-gama*L) ] ;
34
35 %corrente de entrada
36 I1 = [ ((U2+I2*Zc)/(Zc*2))*exp(gama*L) ] - [ ((U2-I2*Zc)/(
      Zc*2))*exp(-gama*L) ] ;
37
38
39 case 2 %Perfil de tensao e corrente a vazio
40 I2=0; %Z2 tende ao infinito
41
42 %Comprimento da Linha
43 L_partes = input('Digite a quantidade de trechos da
      linha: ');
44 L = linspace(0, L, L_partes+1);
45
46 %Tensao de entrada
47 U1 = [ ((U2+(I2*Zc))/2)*exp(gama*L) ] + [ ((U2-(I2*Zc))/2)
      *exp(-gama*L) ] ;
48 %corrente de entrada
49 I1 = [ ((U2+I2*Zc)/(Zc*2))*exp(gama*L) ] - [ ((U2-I2*Zc)/(
      Zc*2))*exp(-gama*L) ] ;
50
51
52 case 3 %Perfil de tensao e corrente sob carga
53 Z2=Zc;
54 P_natural=((U2^2) / Z2);
55 P = [0.5, 1, 1.5] * P_natural;
56 I2 = (P / U2);
57 L_partes = input('Digite a quantidade de trechos da
      linha: ');
58 L = linspace(0, L, L_partes+1);
59
60 for i=1:length(P)
61 for j=1:length(L)
62 U1(i, j) = [ ((U2+(I2(i)*Z2))/2)*exp(gama*L(j)) ] + [ ((U2
      -(I2(i)*Z2))/2)*exp(-gama*L(j)) ] ;
63 I1(i, j) = [ ((U2+(I2(i)*Z2))/(2*Z2))*exp(gama*L(j)) ] -
      [ ((U2-(I2(i)*Z2))/(2*Z2))*exp(-gama*L(j)) ] ;
64 end

```

```

65         end
66
67         %P = P * cos(angle(I1));
68
69         end
70
71         %Resultados da linha
72         switch exper
73
74             case 1
75                 fprintf ( '\nTensao de entrada U: %g < %.2f graus\n',abs
                        (U1),rad2deg(angle(U1)));
76                 fprintf ( 'Corrente de entrada I: %g < %.2f graus\n',
                        abs(I1),rad2deg(angle(I1)));
77
78             case 2
79                 for i=1:length(L)
80                     fprintf( '\n[%d km]\n', L(i));
81                     fprintf ( 'Tensao de entrada U: %g < %.2f graus\n',abs(
                        U1(i)),rad2deg(angle(U1(i))));
82                     fprintf ( 'Corrente de entrada I: %g < %.2f graus\n',
                        abs(I1(i)),rad2deg(angle(I1(i))));
83                 end
84
85                 %Grafico da tensao pelo comprimento
86                 plot(L,abs(U1), 'ro', L, abs(U1), 'b-');
87                 title( 'Tensao no Receptor x Comprimento da LT');
88                 ylabel( 'Tensao [V] ');
89                 xlabel( 'Comprimento [km] ');
90
91             case 3
92                 for i=1:length(P)
93                     fprintf( '\n_____ %d P0
                        _____\n', i*0.5);
94                     fprintf ( 'Potencia: %g < %.2f graus\n', P(i), rad2deg(
                        angle(P(i))));
95
96                 for j=1:length(L)
97                     fprintf( '\n[%d km] \n', L(j));

```

```

98     fprintf ( 'Tensao de entrada U: %g < %.2f graus\n',abs(
        U1(i,j)),rad2deg(angle(U1(i,j)))));
99     fprintf ( 'Corrente de entrada I: %g < %.2f graus\n',
        abs(I1(i,j)),rad2deg(angle(I1(i,j)))));
100    fprintf ( 'Corrente de saida I: %g < %.2f graus\n', abs(
        I2(i)),rad2deg(angle(I2(i)))));
101    end
102    end
103
104    %Grafico da tensao pelo comprimento
105
106    figure(1)
107    plot(L, abs(U1(1,:)), 'ro-', L, abs(U1(2,:)), 'go-', L,
        abs(U1(3,:)), 'bo-');
108    legend('0,5 P0', 'P0', '1,5 P0')
109    title('Tensao no Receptor x Comprimento da LT');
110    ylabel('Tensao [V]');
111    xlabel('Comprimento [km]');
112
113    %Grafico da corrente pelo comprimento
114
115    figure(2)
116    plot(L, real(I1(1,:)), 'ro-', L, real(I1(2,:)), 'go-',
        L, real(I1(3,:)), 'bo-');
117    legend('0,5 P0', 'P0', '1,5 P0')
118    title('Corrente no Receptor x Comprimento da LT');
119    ylabel('Corrente [A]');
120    xlabel('Comprimento [km]');
121    end

```